アマゾン河支流ウカヤリ川における自由蛇行の数値計算

A study on the effectiveness of numerical simulation of large scale meandering river

北海道大学工学部環境社会学科	○学生員	川辺隆介(Ryuusuke Kawabe)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	清水康行(Yasuyuki Shimizu)
北海道大学大学院工学研究院	正会員	久加朋子(Tomoko Kyuka)
北海道大学大学院工学研究院	正会員	今日出人(Hideto Kon)

1. 研究背景

数十年という長期間の河道形状の変化を考えた場合, 現在の河道形状は一時的なものであり,流路の形は流域 の降雨特性や地形,地質,長期間にわたる浸食や堆積の 影響を受け,常に動的に変化している.特に,人工的に 整備されていない自然状態の浸食性河岸を有する沖積河 川では,大規模に流路の自由蛇行が発達する現象が数多 く確認されている.こうした河川の自由蛇行の発達は, Google Earth Engine (https://earthengine.google.com/) にお いても,南米に位置するアマゾン川流域では,30 年程

度の短期間において大規模に流路形状が変化する様子を 確認することができる. 図-1に南米に位置するアマゾン川とその主な支川の位 置を示す.アマゾン川は世界最大の流域面積を持つ河川 として知られており,その上流部に位置するペルーを北 から南に流れるウカヤリ川(図-1の黄色線)も,非常に スケールの大きな河川である.ウカヤリ川の川幅は 600m から 900m ほどであり,アマゾン川の主な支川の 一つである.

図-2 に、2016年のウカヤリ川の衛星写真を示す.こ の衛星写真から、河道が左右に大きく蛇行していること が分かる.また、三日月湖(Oxbow lake)の痕跡から、 流路は次第に蛇行から迂曲へと発達し、それに伴う流路 短絡現象(Neck-cutoff)が生じていることも確認できる. さらに、図-2によるとウカヤリ川の川幅は常にほぼ一定 を保ったまま流路が大きく蛇行しているように見える. これより、ウカヤリ川の流路地形は、Parkerら¹⁾の提案 する Slump block(粘着性土砂を含んだ河岸崩落材料) が一時的に河岸侵食を抑制することで流路全体として河 幅をほぼ一定に保ったまま蛇行発達する現象によって形 成されてきたものである可能性が考えられる.

河川の蛇行現象のメカニズムについては、これまで 多くの研究がなされている^{2),3/など}.しかし、その中でも 実河川スケールが広大で、かつ水路実験スケールでの再 現が難しい自由蛇行の発達については報告が限られてお り、流域の水理条件と自由蛇行の発達との間の関係性に は未解明の部分が多い状況にある.また、実河川の流路 変動を定量的に評価するために開発が行われている数値 解析モデルにおいても、自由蛇行河川のような蛇行部が 迂曲化し、Neck-cutoff(流路短絡)するような場では格 子が交差するなど著しく変形するため、その流路変動特 性を検討するための計算技術も十分に確立されていると は言い難い.こうした状況に置いて、旭ら⁴⁾の検討で



図-1 アマゾン川とその主な支流 (背景画像: Google Earth より取得)



図-2 ウカヤリ川 (Google Earth より取得,撮影:2016)

は、既往の非定常平面 2 次元河床変動モデル ⁵改良し、 粘着性河岸崩落に伴う Slump block,流路内岸砂州の前 進,流路迂曲に伴う Neck-cutoff 現象を扱うための新た な計算格子処理法などを組み込むことで、自由蛇行河川 における流路変動特性をある程度再現できたことを報告 している.彼らの報告によると、自由蛇行の発達には流 量の非定常性が大きな役割を果たしており、出水時に河 岸が浸食され、平水時に陸地化が進むことを数値計算結 果より考察している.しかしながら、旭らの報告を含め、 自由蛇行河川を扱う報告の多くが理論解析、あるいは実 験水路程度の規模、もしくは低水路幅が数+メートルの 実河川を想定した条件での計算であり、アマゾン川やそ の支川であるウカヤリ川のような川幅 500m~1000m に 及ぶ大河川を対象にその流路変動現象を数値解析から再 現した報告は存在しない. そこで本研究では、ほぼ自然状態において 30 年程度 の短時間で自由蛇行が顕著に発達するアマゾン川支川の ウカヤリ川を対象とし、数値解析モデルを用いてその流 路変動特性を把握することを目的とする.実河川スケー ルでの計算へと発展させることで、数値モデルの実スケ ール規模での再現性を確認すると共に、実河川で観測さ れた経年的な流路変動特性を数値解析結果より説明する ことを試みる.

2. 方法

2.1 数値計算モデル

本研究では,旭らの報告⁴⁾と同様の非定常平面2次元 河床変動モデルを用いる.この数値計算モデルの主な特 徴は,(1)流路の移動に応じて計算格子の更新を行うこ と,(2)蛇行内岸側への平水時における植生侵入に伴う 陸地化を考慮し,蛇行内岸部の前進を考慮していること, (3)蛇行流路の迂曲かに伴う Neck-cutoff(流路短絡)を 考慮していることが挙げられる.以下,各々のモデルに ついてその概要を概説する.

計算格子の更新

図-3に、本モデルにおける計算格子の更新の概要を示 す.図-3-aに示すように、本モデルの数値計算の初期条 件の格子形状は、流路方向と横断方向の格子線ができる 限り直交するように作成する.しかし、自由蛇行の計算 では、図-3-bのように計算が進むと徐々に蛇行部が移動 し、それに伴い境界適合座標の計算格子が移動するため、 格子形状が次第に歪む問題がある.格子の歪みや交差は 計算精度や計算安定性と直結するため、図-3-cのように 適宜計算領域の変化に伴って格子を再設定することで、 計算が進んで流路が大きく移動しても安定な計算ができ るようにしている.

(2) 蛇行内岸部の前進(陸地化)

本モデルでは、出水時に蛇行外岸側が洗掘され、蛇行 が移動することが想定される.一方で、アマゾン川のよ うな熱帯の自由蛇行河川では、長期的に低流量が続く時 期に蛇行内岸側に出水時に形成された裸地砂州に植生が 侵入するものと想定される.本モデルでは、こうした植 生侵入に伴い自由蛇行流路の蛇行内岸部が陸地化し、固 定砂州が前進するものと仮定をおいて、図-4に示すよう な陸地化モデルを導入している.図-4に示すとおり、陸 地化モデルでは平水時程度の流量を流下させた場合の水 深を設定し、計算タイムステップ毎に冠水しない領域を 特定する.冠水しないセルがあった場合、そこを陸地化 したとして、その箇所を計算領域から除外する.除外す る領域は、陸地化係数で表される.陸地化係数が1のと き冠水しない領域がすべて除外され、陸地化係数が0の とき全く陸地化が進行しないことになる.

(3) 蛇行流路の Neck-cutoff (流路短絡)

自然状態の河川では蛇行が進行していくと湾曲部と湾 曲部が接合し,新たな流路を形成し,元の流路は三日月 湖となる現象が起こる.この現象は,自由蛇行河川の発



図-5 自然短絡モデル・格子再配置イメージ4)

達において特徴的な現象であり,アマゾン川やその支川 のウカヤリ川の長時間の流路変動を考えるうえで大きな 影響があると考えられる.図-5は自然短絡モデルの格子 再配置のイメージ図である.

2.2 計算条件

本研究で数値計算の対象とするのは、アマゾン川の支 流であり、ペルーを北から南に向かって流れるウカヤリ 川の一部である.図-6に計算対象の1984年の衛星写真 を示す.計算対象区間の河道距離は約90km,川幅がほ ぼ一定で600m~700mであり、図-1の赤枠で囲まれた区 間に該当する.図-6の場所では、過去30年間で大規模



図-6 計算対象の衛星写真(撮影:1984) (南緯9度28分, 西経74度11分付近)

な流路変動や自然短絡現象もみられることから本研究の 数値計算結果との比較に適する場所であると考えている. 図-6 に示す衛星写真は, Google Earth から取得したもの であるが、今回の対象地域では1984年から2016年まで の一年毎の衛星写真を見ることができる.

図-7 に William Santini らの調査^のによるウカヤリ川の プカルパという都市付近での流量を示す.図-7によると, ウカヤリ川では一年の中で、流量の少ない乾期(6月~ 11月)と流量の多い雨期(12月~5月)があることが分 かる. プカルパにおける乾季の平均流量は約 5,000 m^{3/}s, 雨期の最大流量は約2,0000 m³s である.本研究の研究対 象箇所は、プカルパから直線距離で約 130 km 上流に位 置しており、その間に小さな支流との合流点もあること から、計算上の流量はプカルパの観測値の 3/4 程度で与 えることとした.図-8は計算で用いたハイドログラフの 内、一年分のみを表したグラフである.図-8のとおり、 最も少ない流量を3,000 m^{3/}s,最も多い流量を15,000 m^{3/}s として、流量上昇と低下にかかる時間を同じとみなした 流量ハイドログラフを与えている.本計算では1年間の 計算を行うものとする.

図-9 に本計算での計算格子を示す.格子は, 1984 年 の対象地域の衛星写真より作成している.計算区間の河 道延長は約90kmで、計算開始時の低水路幅は700mで 一定としている.格子サイズは,平均して流下方向約 360 m, 横断方向約 50 m となるように設定し, Bernd ら の調査 7)を参考に、河床勾配は 0.000054、河床材料の平



図-9 初期計算格子

均粒径は 0.25 mm を与えている.計算初期の河床形状は 平坦河床とし、計算開始時の河岸には 5 m, 安息角は 45°を与えている.

3.2 計算結果·比較

図-10に計算結果の水深コンター図を示す.図-10より,





図-11 計算終了時の横断面の水面高と河床高

計算結果の各蛇行部を見ると,河岸が浸食されて河道が 外側に広がっているのに加え,内側が陸地化しているの も確認できる.図-11 は図-10 中の赤線部分での水面高と 河床高を示した横断図である.図-11 より,計算開始時 は平坦河床を与えているが,計算終了時では蛇行部の外 側で水深が大きく,内側で水深が小さくなっている.こ のことから蛇行部外側で河床浸食が進み,内側で堆積が 進んでおり,蛇行部では外岸側から内岸側へ土砂を輸送 する2次流が発達していることが分かる.これより,さ らなる詳細な考察が必要ではあるが,まずは,本計算に てウカヤリ川における自由蛇行の発達と土砂移動のプロ セスをある程度再現できているものと考えられる.

次に、図-12に計算対象地域の1984年、1985年、1992 年の衛星写真を示す.図-12-(a)や図-12-(b)と計算結果 を比較すると、実河川の1年間では計算上の1年間ほど の河道変化は見られないことが分かる.実河川が計算上 の1年後の河道形状に比較的近い河道形状になるのは図 -12-(c)の1992年であり、8年後である.これは、実河川 とモデル上での計算の河道変化に要する時間が大きく異 なることを示唆している.この原因としては、流量、河 岸浸食に関わるパラメータなどの水理条件が適切でなか ったことが考えられ、今後の課題である.

4. 結論

本研究では、衛星画像にて 30 年程度におよぶ自由蛇 行流路の発達が確認できるアマゾン川支川ウカヤリ川の 一部を対象とし、その流路変動特性を把握することを目 的として数値解析を行った.その結果、河道変動に関し ては蛇行外岸側にて河岸浸食、蛇行内岸側の前進(陸地 化)に伴う蛇行流路の移動現象を確認することが出来た. また、河床の横断形状に着目すると、内岸側にて堆積、 外岸側にて洗掘が確認でき、2 次流れによるなど実際の 河川に近い挙動を再現することができた.しかし、実河 川とモデル上での計算の、河道変化に要する時間が大き く異なることが分かった.この点に関しては、水理条件 の問題か、モデル改良が必要か、 さらなる検討が必要 である.また、今回は1年間のみの計算であったので、 今後さらに計算時間を延ばし、流量の非定常性が長期間



図-12 対象の衛星写真(Google Earth) a) 1984 年, b) 1985 年, c) 1992 年

の河道変化に与える影響についても考察していく.

謝辞

本研究の論文の執筆にあたって,渡邉健人氏(北海道大 学大学院)から多くの助言を頂いた.その他協力いただ いた皆様にこの場を借りて感謝の意を表する.

参考文献

- Parker, G., Y. Shimizu, G. V. Wilkerson, E. C. Eke, J. D. Abad, J. W. Lauer, C. Paola, W. E. Dietrich and V. R. Voller : A new framework for modeling the migration of meandering rivers, Earth Surface Processes and Landforms, 36(1), pp.70-86, 2011.
- (2) Ikeda, S., G. Parker, and K. Sawai : Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development, J. Fluid Mech., 112, pp. 363–377, 1981.
- (3) 長谷川和義:沖積蛇行の平面および河床形状と流れ に関する水理学的研究,北海道大学学位論文, 1984.
- (4) Kazutake Asahi, Yasuyuki Shimizu, Jonathan Nelson, and Gary Parker Numerical simulation of river meandering with self-evolving banks : JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: EARTH SURFACE, VOL. 118, 2208–2229, 2013
- (5) 清水康行,平野道夫,渡邊康玄:河岸浸食と自由蛇行の数値計算,水工学論文集 第40巻,pp. 921-926, 1996
- (6) William Santini, Jean-Michel Martinez, Raul Espinozavillar, Gerard Cochonneau, Philippe Vauchel, Jeansebastien Moquet, Patrice Baby, Jhan-Carlo Espinoza, Waldo Lavado, Jorge Carranza & Jean-Loup Guyot : Sediment budget in the Ucayali River basin, an Andean tributary of the Amazon River, Proceedings of a symposium held in New Orleans, Louisiana, USA, December 2014
- (7) Bernd Ettmer and Cesar Adolfo Alvarado-Ancieta : Morphological development of the Ucayali River, Peru without human impacts, Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz 10,2010